第30卷 第6期
2016年6月

材 料 研 究 学 报
CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH

Vol. 30 No. 6
June 2016

硬磁颗粒填充与充磁对磁敏弹性体磁控力学行为的影响*

赵慧婷[1] 廖昌荣[1] 章 鹏[1] 简晓春[2]

1. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400030
2. 重庆交通大学交通运输学院 重庆 400074

摘 要 制备了4种钕铁硼粉填充型磁敏弹性体和4种羰基铁粉与钕铁硼粉混合填充的磁敏弹性体, 对上述磁敏弹性体进行不同强度充磁, 并利用数码显微镜观察其微观结构, 使用振动样品磁强计测试了样品的磁化特性曲线, 采用流变仪对磁敏弹性体的力学性能进行测试, 分析不同充磁强度对钕铁硼粉填充型磁敏弹性体磁控力学性能的影响, 以及硬磁颗粒的质量分数与剩磁对磁敏弹性体磁控力学性能的影响。结果表明, 充磁强度越大, 钕铁硼粉填充型磁敏弹性体力学性能受磁场影响越大, 适量的硬磁颗粒、增大充磁能提高磁敏弹性体磁控范围。

关键词 有机高分子材料, 磁敏弹性体, 磁控力学性能, 硬磁颗粒, 剪切储能模量

分类号 TB324 文章编号 1005-3093(2016)06-0457-08

Effect of Hard Magnetic Filler and Magnetization on Magneto-control Mechanical Behavior of Magneto-active Elastomers

ZHAO Huiting[1] LIAO Changrong[1**] ZHANG Peng[1] JIAN Xiaochun[2]

1. Key Lab for Optoelectronic Technology and Systems, Chongqing University, Chongqing 400030, China

2. Transportation Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

*Supported by National Natural Science Foundation of China No. 51575065 and the Fundamental Research Funds for the Central Universities No.106112015CDJZR125517.

Manuscript received September 25, 2015;in revised form March 14, 2016.

**To whom correspondence should be address, Tel: (023)65111017, E-mail: crliao@cqu.edu.cn

ABSTRACT Two types of magneto-active elastomers (MAEs) with fillers of NdFeB powder and powder mixture of carbonyl iron and NdFeB are prepared respectively, and then they were all magnetized by different magnetization intensities. The microstructure of MAEs is characterized by KEYENCE VHX-600 digital microscope. The magnetization characteristic curves and the mechanical properties of MAEs were measured by VSM and MCR-301 rheometer respectively. The influence of the fraction and magnetic remanence intensity of the hard magnetic fillers on the magneto-control mechanical behavior of the MAEs was carefully examined.The results demonstrated that the mechanical properties of MAEs filled with NdFeB powder were affected strongly by the intensity of magnetic field adoped for magnetization treatments. An appropriate amount of the hard magnetic fillers and the magnetization by higher magnetic field intensity are beneficial to the improvement of the shear storage modulus of the MAEs.

KEY WORDS organic polymer materials, magneto-active elastomer, magneto-control mechanical property, hard magnetic filler, shear storage modulus

磁敏弹性体(Magneto-active elastomer, MAE)是一种新型的磁控智能材料, 它是将微米量级的铁磁性颗粒分散于高分子聚合物中, 在特定工艺下固化而成的力学性能受外加磁场控制的弹性体材料[1-4]。利用磁场来控制磁敏弹性体力学性能, 在减振、降噪等领域具有潜在的工程应用, 目前磁敏弹性体已初步应用于可变刚度轴衬、减振器、阀门等领域[5-7]。传统的磁敏弹性体采用羰基铁粉等软磁颗粒作为填充因子, 国内外学者针对软磁颗粒的形状、粒径、质量

* 国家自然科学基金项目 51575065 和中央高校基本科研业务费 106112015CDJZR125517 资助。
2015年9月25日收到初稿; 2016年3月14日收到修改稿。
本文联系人: 廖昌荣, 教授
DOI: 10.11901/1005.3093.2015.551

分数、磁学性质等对磁敏弹性体磁控力学性能的影响作了大量研究[8-10], 关于磁敏弹性体的研究包括磁控力学性能、电学性能等均是基于软磁颗粒填充材料开展的[11-14]。近年来, 一些学者开始将关注点转向硬磁颗粒填充。Stepanov 等人[15-18]不仅研究了纯NdFeB颗粒填充的磁敏弹性体的磁化特性曲线, 还探索了应变、频率以及外加磁场方向对材料磁致模量的影响。Borin 等人[19]发现形变与剩磁对磁化后纯NdFeB颗粒填充的磁敏弹性体的拉伸模量有影响, 样品磁化后拉伸模量最大变化量为360%。虽然Stepanov 等人针对硬磁颗粒填充的磁敏弹性体作了一系列研究, 但其使用的材料弹性模量很小, 数量级仅为10^4 Pa, 机械性能不理想, 并且磁敏效应有限, 还无法投入应用。目前关于硬磁颗粒填充的磁敏弹性体研究还处于起步阶段, 针对其磁控力学性能的认识还很不足, 因此有必要进一步探讨, 为开发新型的磁控力学材料及器件提供技术基础。

2 磁敏弹性体的制备

2.1 实验材料

采用羰基铁粉(型号: SQ, 粒径3.5 μm, BASF, 德国)和钕铁硼粉(粒径50 μm, 四川绵阳西磁有限公司)作为填充颗粒, 双组分室温硫化硅橡胶(深圳红叶杰科技)作为基体, 硅烷偶联剂作为钕铁硼粉的表面处理剂, 二甲基硅油作为增塑剂, 制备磁敏弹性体。

2.2 磁敏弹性体的制备工艺

钕铁硼粉表面预处理: 由于钕铁硼颗粒粒径较大, 属亲水性, 硅橡胶为亲油性, 为提高钕铁硼粉与硅橡胶的结合程度, 采用硅烷偶联剂对钕铁硼粉作表面预处理。将钕铁硼粉在硅烷-乙醇混合溶液中浸泡搅拌10 min, 再置于真空干燥箱中在80℃下烘干1 h。

纯硬磁填充型磁敏弹性体的制备工艺流程如图1所示。首先根据配比称取各组分, 将称好的钕铁硼颗粒预处理, 再与硅油混合, 加入硅橡胶A组分、$(m_A+m_{Simethicone})\times 0.03$ 的B组分(固化剂的用量决定了固化前的操作时间及固化速度), 充分搅拌均匀后, 将样品放入真空干燥箱中排气泡, 此环节时间不能超过10 min, 最后倒入铝合金制成的模具中固化。固化成型后用充磁机(DCD-1200/2-50, 哈尔滨先达有限公司)给样品充磁便合成了各向同性的磁敏弹性体。充磁机由高压电容通过一个电阻极小的线圈放电产生巨大磁场, 给硬磁颗粒充磁, 充磁电压越大, 硬磁颗粒剩磁越大。各向异性硬磁填充型磁敏弹性体在样品倒入模具后即置于600 mT的均匀磁场中预结构化40 min, 然后取出放在常温下固化约2 h。

制备混合填充的磁敏弹性体的步骤与各向同性硬磁填充型磁敏弹性体一样, 唯一区别在于填充颗粒为钕铁硼粉与羰基铁粉。

2.3 磁敏弹性体样品

为研究硬磁填充的磁敏弹性体的力学性能, 制备硬磁颗粒质量分数为70%的各向同性、各向异性的磁敏弹性体, 制备参数如表1所示。样品编号1对应各向异性硬磁MAE, 2、3、4分别对应不同电压充磁下的硬磁MAE。为探究剩磁大小对混合磁敏弹性体力学性能的影响, 制备了羰基铁粉(60%)+钕铁硼粉(20%)质量分数的混合磁敏弹性体, 样品编号分别为5、6、7、8, 进行不同电压充磁。为便于描述, 本文使用"60%+20%"的简称术语来指代该样品, 下文中其他样品用同样的方式描述。为探索硬磁颗粒质量分数对混合磁敏弹性体力学性能的影响, 制备羰基铁粉+钕铁硼粉质量分数为80%+0、70%+10%、40%+40%的混合磁敏弹性体。

3 硬磁颗粒填充型磁敏弹性体的磁控力学行为

磁敏弹性体的动态力学性能表现为弹性体在交变应力(应变)作用下的响应, 通常用剪切储能模量G'、剪切耗能模量G''、损耗因子$\tan\delta$表征, 其中, G'反映了材料的刚度或储存机械能的能力, 属于材料的弹性部分, G''反映了材料将机械能转换为热能损耗的能力, 属于材料的粘性部分, $\tan\delta$是材料阻尼的量度。因磁敏弹性体的应用多是基于其变刚度

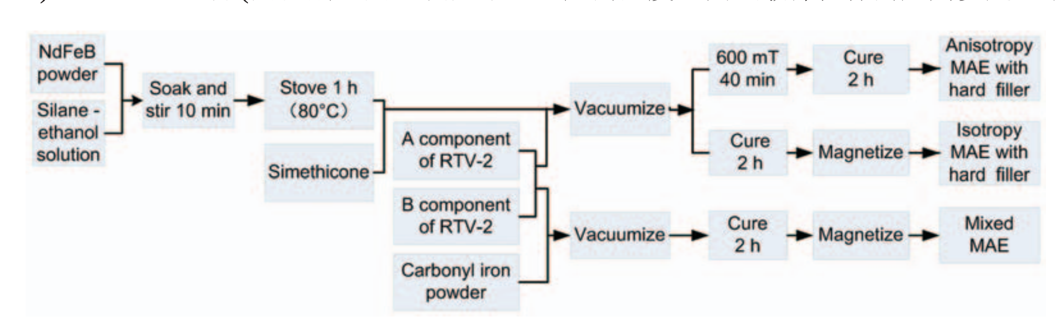


图1 磁敏弹性体的制备流程

Fig.1 Preparation process of MAE

特性, 故主要讨论剪切储能模量。

3.1 硬磁填充的磁敏弹性体微观结构与磁化特性

为了更清楚地认识磁敏弹性体的内部结构, 使用KEYENCE VHX-600数码显微镜对样品1、4的切面进行微观结构拍摄, 放大倍数取500倍, 结果如图2所示。

由图2可看出各向异性磁敏弹性体内部虽未呈现出明显的链状结构, 但部分硬磁颗粒沿着磁场方向形成较为有序的结构。部分硬磁颗粒被磁化, 并受到磁场力的作用, 克服基体阻力, 沿着磁场方向有序排列。

为了解充磁对各样品的剩余磁化强度及磁化特性的影响, 使用振动样品磁强计对样品进行磁化特性扫描, 测试磁场范围为0~12 koe, 结果如图3所示。磁化曲线的初始值(H=0)反映了样品的剩余磁化强度。从图3中的初始值可明显看出, 充磁电压越大, 充磁后样品的剩余磁化强度越大。而各向异性硬磁弹性体也呈现出弱磁化现象。因样品内仅NdFeB颗粒可被磁化, 故NdFeB的磁学性能对样品的磁化特性起决定性作用, 图4给出了NdFeB粉末的磁滞回线。由于NdFeB颗粒磁化强度随着磁场的增大而增加, 导致各样品的磁化强度也随着磁场的增加而增加, 且12 koe时磁化强度均未饱和。

3.2 硬磁填充的磁敏弹性体测试与分析

使用型号为MCR-301的流变仪在振荡剪切模式下测试硬磁填充的磁敏弹性体。预应力设置为5 N, 应变幅值取0.01%, 频率为10 Hz, 样品尺寸为 ϕ 20 mm × 2 mm, 测试磁场取-1.2 T~1.2 T, 其

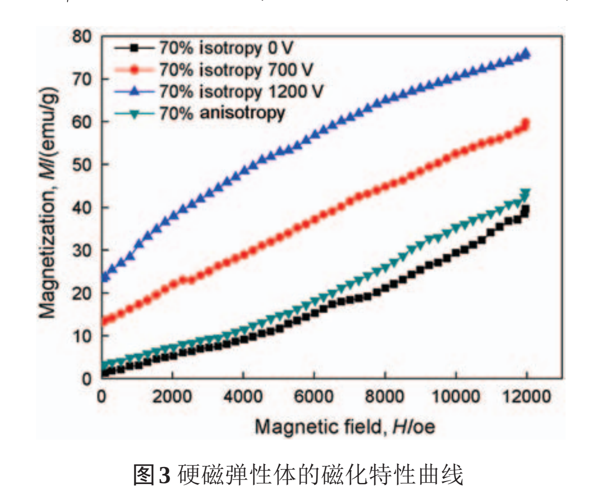


图3 硬磁弹性体的磁化特性曲线
Fig.3 Magnetization curve for MAE with hard magnetic filler

表1 磁敏弹性体的制备参数
Table 1 Preparation parameters of MAEs

Samples No.	Carbonyl iron powder /%,mass fraction	NdFeB powder /%, mass fraction	A component of RTV-2 /%, mass fraction	Simethicone /%, mass fraction	Magnetizing voltage /V
1	0	70	15	15	-
2	0	70	15	15	0
3	0	70	15	15	700
4	0	70	15	15	1200
5	60	20	10	10	0
6	60	20	10	10	700
7	60	20	10	10	1000
8	60	20	10	10	1200

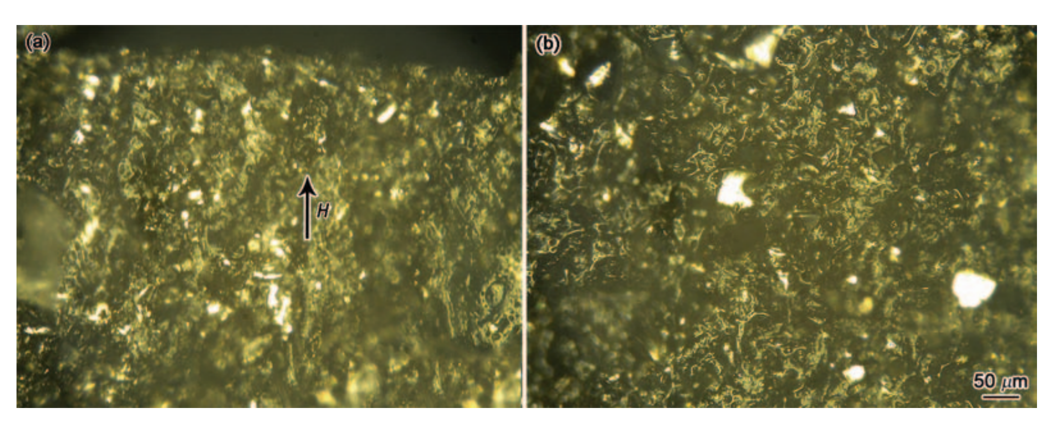


图2 硬磁填充的磁敏弹性体内部微观结构: (a)各向异性; (b)各向同性
Fig.2 Internal microstructures of MAEs with hard magnetic filler: (a) anisotropy and (b) isotropy

中, 正向表示测试磁场方向与表面磁场方向(因样品的表面磁场反映了剩磁强度, 故用表面磁场方向代表剩磁方向)相同, 负向表示测试磁场方向与表面磁场方向相反。因流变仪提供的测试磁场方向始终竖直向上, 具体操作是将样品反向测试, 对4组样品进行磁场扫描, 测试结果如图5所示。

由图5可看出各向异性硬磁弹性体的剪切储能模量大于各向同性硬磁弹性体, 原因是各向异性硬磁弹性体内部分硬磁颗粒在固化磁场作用下成链后, 使得样品抵抗剪切应变的能力增强, 宏观表现为剪切模量更大。但各向异性硬磁弹性体的磁场扫描曲线不平缓, 存在一些下降点。由于样品的剪切储能模量表征的是样品的刚度, 并与样品内部结构及颗粒间的相互作用力有关, 而颗粒间的相互作用力不会随着磁场增大而减小, 故上述现象意味着在磁场增大过程中, 样品的内部结构出现了微调导致某些磁场下样品刚度下降, 说明样品内部受力不均, 结构不稳定。这是因为固化磁场磁化了部分硬磁颗粒, 并带动其周围的束缚橡胶在局部形成链状后, 导致弹性体内某些位置链状颗粒聚集, 某些位置出现缺陷。当磁场增大到一定值时, 颗粒链多的地方吸引力足够大到使周围被磁化的粒子靠近, 形成更粗壮的链, 而此结构微调的过程中弹性体较为松散。当流变仪的转子对弹性体施加载荷时, 会感受到弹性体的刚度下降, 因此剪切模量会出现某些分立的下降值。结构微调后的弹性体, 颗粒链间相互作用力随着磁场的增大继续增大, 剪切模量增加。

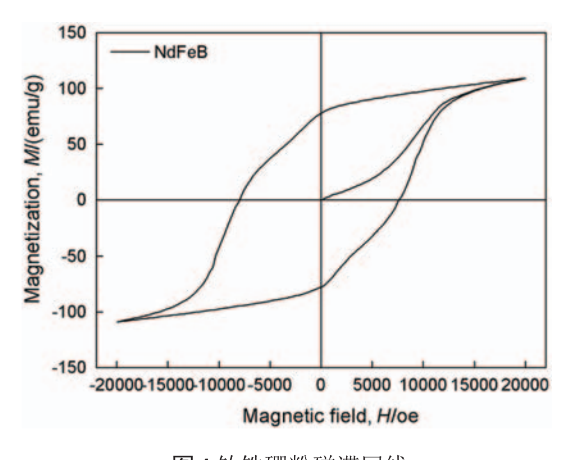


图4 钕铁硼粉磁滞回线

Fig.4 Hysteresis loops for NdFeB powders

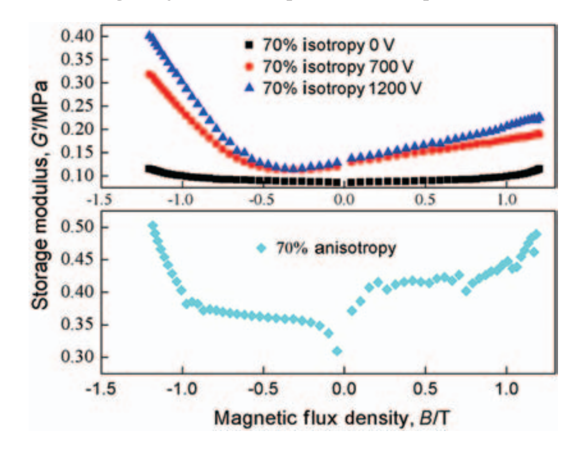


图5 硬磁弹性体剪切储能模量与磁场的关系

Fig.5 Magnetic field dependence of shear storage modulus for MAE with hard magnetic filler

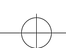
对于各向同性硬磁弹性体来说, 结合图3、4、5分析可知, 由于未充磁样品的磁化强度在低磁场下较小, 颗粒间的相互作用很弱, 磁场较大时磁相互作用力才足够大到使得剪切模量开始增加。充磁电压越大, 充磁后样品的剩余磁化强度越大, 颗粒间的相互作用越大, 因此剪切模量随着充磁电压的增大而增大。由图5可看出, 充磁样品的剪切模量的最小值并不在磁场扫描曲线的零点, 当测试磁场方向与剩磁方向一致时, 硬磁颗粒的磁化强度随测试磁场的增加而增大, 硬磁颗粒间的相互吸引力增强, 并趋于沿着磁场方向排列, 在竖直方向上将橡胶束缚得更紧, 刚度更大, 因此剪切模量随着测试磁场的增大而增大。而当测试磁场方向与颗粒磁化方向相反时, 硬磁颗粒在力矩的作用下, 趋于旋转到与测试磁场方向一致, 初始排列被破坏, 同时在测试磁场增大的起始阶段, 硬磁颗粒的磁化强度随磁场的增大而减小, 刚度减小, 剪切模量随着测试磁场的增大而减小。当测试磁场增大到一定值后, 硬磁颗粒被反向磁化, 内部颗粒重新排列到达稳定状态, 此时硬磁颗粒的磁化强度随着磁场的增大而增大, 颗粒间的磁相互作用力开始随着测试磁场的增加而增加。因此当测试磁场方向与颗粒剩磁方向相反时, 剪切模量随测试磁场的增加先减小后增大。由图5还可看出, 充磁电压越大, 剪切模量随磁场变化越大, 因为由图3可知, 相同磁场下, 充磁电压越大, 样品的磁化强度与初始值相比变化越大, 说明硬磁颗粒磁化强度变化越大, 颗粒间磁相互作用力变化越大, 反映在剪切模量上变化越大。

综上所述, 与软磁弹性体不同的是, 硬磁弹性体的力学性能表现出对磁场方向的依赖性。由此可知剩磁影响了硬磁弹性体的磁控力学行为。充磁电压越大, 硬磁颗粒的剩磁越大, 剪切模量对测试磁场的作用越敏感, 受测试磁场的影响越大。

4 羰基铁粉与钕铁硼粉混合填充的磁敏弹性体磁控力学行为

4.1 混合磁敏弹性体微观结构与表面磁场

为更清楚的认识混合磁敏弹性体, 使用数码显



微镜对样品5、8的内部结构进行拍摄, 结果如图6所示。

因混合磁敏弹性体固化后填充颗粒被基体束缚, 充磁也无法使颗粒摆脱基体的阻力, 因此充磁前后弹性体结构并未改变, 仍为各向同性磁敏弹性体。为观察充磁对混合磁敏弹性体磁学性能的影响, 使用振动样品磁强计对样品进行磁化特性测试, 测试结果如图7所示。由图7中各样品的初始磁化强度可知, 充磁电压越大, 充磁后样品剩余磁化强度越大。

4.2 混合磁敏弹性体磁控力学性能测试与分析

按照3.2节同样的测试条件, 取测试磁场为0~1.2 T, 对样品5~8进行磁场扫描, 实验结果如图8所示。可以看出, 相同磁场下, 混合磁敏弹性体的剪切储能模量随着剩磁的增大而增大。原因是充磁使混合磁敏弹性体内部的硬磁颗粒被磁化, 由于硬磁颗粒具有高剩磁, 充磁后类似"小磁铁", 即使无外加磁场, 颗粒也会在其周围局部提供一个"内置磁场", 将包覆在硬磁颗粒表面的羰基铁粉磁化, 在硬磁颗粒"内置磁场"作用范围内, 硬磁颗粒之间、硬磁颗粒与羰基铁颗粒之间、羰基铁颗粒之间都会产生磁相互作用力。充磁电压越大, 剩磁越大, "内置磁场"越大, 样品更结实、紧密。磁致剪切模量和磁流变效应是评价磁敏弹性体的重要参数, 可分别由式1、式2算出, 计算结果如表2所示。

$$\Delta G = G'_{max} - G_0 \tag{1}$$

$$\beta = \frac{G'_{max} - G_0}{G_0} \times 100\% \tag{2}$$

结合图8和表2可知, 对于软/硬磁颗粒质量分数为60%+20%的混合磁敏弹性体来说, 剩磁增加使

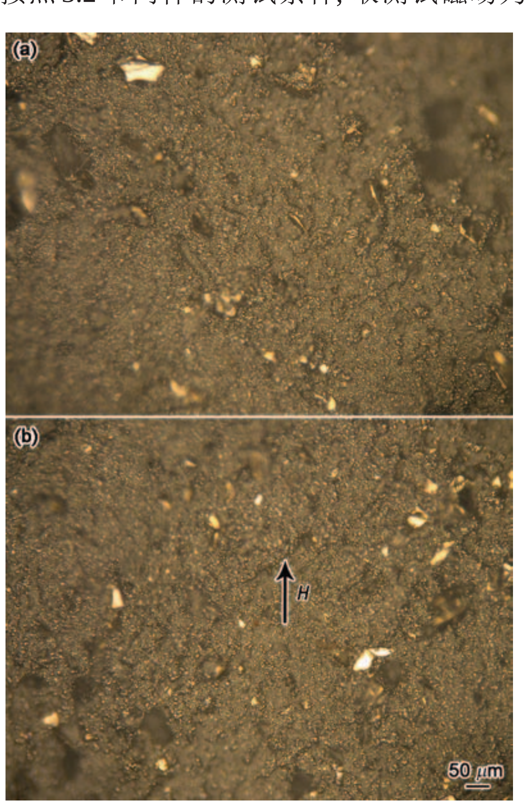


图6 混合磁敏弹性体内部微观结构: (a) 未充磁; (b)充磁

Fig.6 Internal microstructures of mixed MAEs: (a) non-magnetize and (b) magnetized

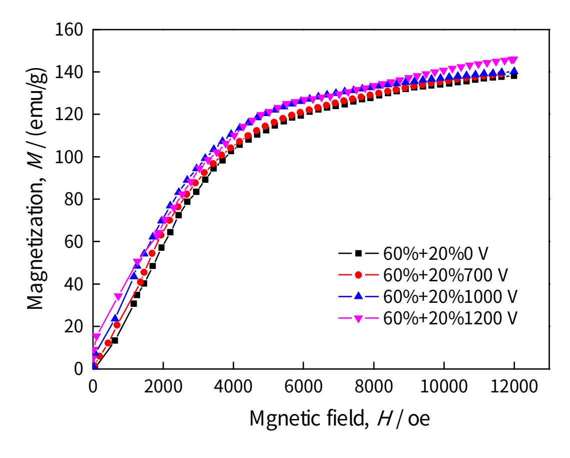


图7 混合磁敏弹性体的磁化特性曲线

Fig.7 Magnetization curve for the mixed MAE

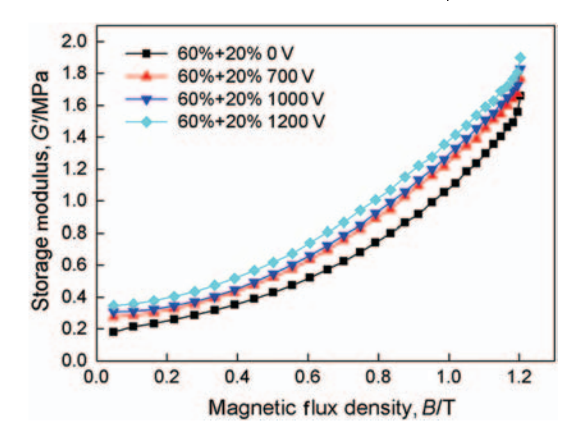


图8 不同充磁电压混合磁敏弹性体的剪切储能模量与磁场的关系

Fig.8 Magnetic field dependence of storage modulus for 60% + 20% mixed MAE of different magnetizing voltages

表2 混合磁敏弹性体的初始剪切储能模量、磁致剪切模量、磁流变效应

Table 2 Initial shear storage modulus, magneto-induced shear modulus and MR effect for 60%+20% mixed MAEs

Samples No.	Initial shear storage modulus (G_0)/MPa	Magneto-induced shear modulus (ΔG)/MPa	MR effect (β)/%
5	0.18	1.47	817
6	0.27	1.50	556
7	0.31	1.52	490
8	0.35	1.55	443

磁场扫描曲线整体向上平移，而磁致模量改变不大，但也表现出了一定的增加趋势，并且由于受到了初始剪切模量的影响，磁流变效应随着剩磁增大反而减小。磁致模量与样品总磁相互作用力的变化量直接相关，当各成分质量分数相同时，磁致模量主要取决于样品的磁学性能以及内部结构。由之前的分析可知，充磁前后弹性体内部结构不变，因此样品的磁学性能起主导作用。由图5可观察到，充磁电压越大，硬磁弹性体的磁致模量越大，即颗粒间作用力变化越大，故硬磁颗粒间的作用力对混合磁敏弹性体磁致模量随剩磁增加有一定贡献。由图3可知，相同磁场下，充磁电压越大，样品的磁化强度与初始值相比变化越大，说明硬磁颗粒磁化强度变化越大。弹性体内羰基铁颗粒受到的总磁场为 $H=H_{in}+H_{out}$，其中，H_{in} 表示"内置磁场"，H_{out} 表示流变仪提供的测试磁场。相同外磁场下，充磁电压越大，硬磁颗粒磁化强度变化越大，H_{in} 变化越大，导致包覆于硬磁颗粒周围的羰基铁颗粒的磁化强度变化越大，而磁性颗粒间的相互作用力与颗粒磁化强度的乘积成正比，因此硬磁颗粒与羰基铁颗粒之间、羰基铁颗粒之间的磁相互作用力变化越大，但由于硬磁颗粒含量较少，"内置磁场"作用范围有限，因此磁致模量随剩磁增加的趋势不明显。由以上分析可知，充磁后的硬磁颗粒在样品中起到了补强的作用。

4.3 硬磁颗粒质量分数对混合磁敏弹性体力学性能的影响

采用上节同样的测试条件，对羰基铁粉+钕铁硼粉质量分数为80%+0、70%+10%、40%+40%的混合磁敏弹性体进行磁场扫描，得到如图9、10所示的实验结果。由图9(a-d)可看出，硬磁颗粒质量分数大的混合磁敏弹性体的剪切储能模量在低磁场时较大，由于羰基铁颗粒磁化强度随磁场增加的幅度大于NdFeB，因此当磁场大于600 mT后，羰基铁粉质量分数越大，总磁相互作用力越大，样品的剪切储能模量越大，磁致模量也越大。在填充颗粒总质量分数不变的前提下，样品的磁致模量、磁流变效应主要取决于羰基铁粉在弹性体内的质量分数，但由图9(b)~(d)可知，充磁后，硬磁颗粒质量分数大的样品在低磁场下剪切模量更大。

图10显示了剩磁对软/硬磁颗粒质量分数为70%+10%、40%+40%的混合磁敏弹性体的剪切储能模量与磁场关系的影响。填充颗粒质量分数相同

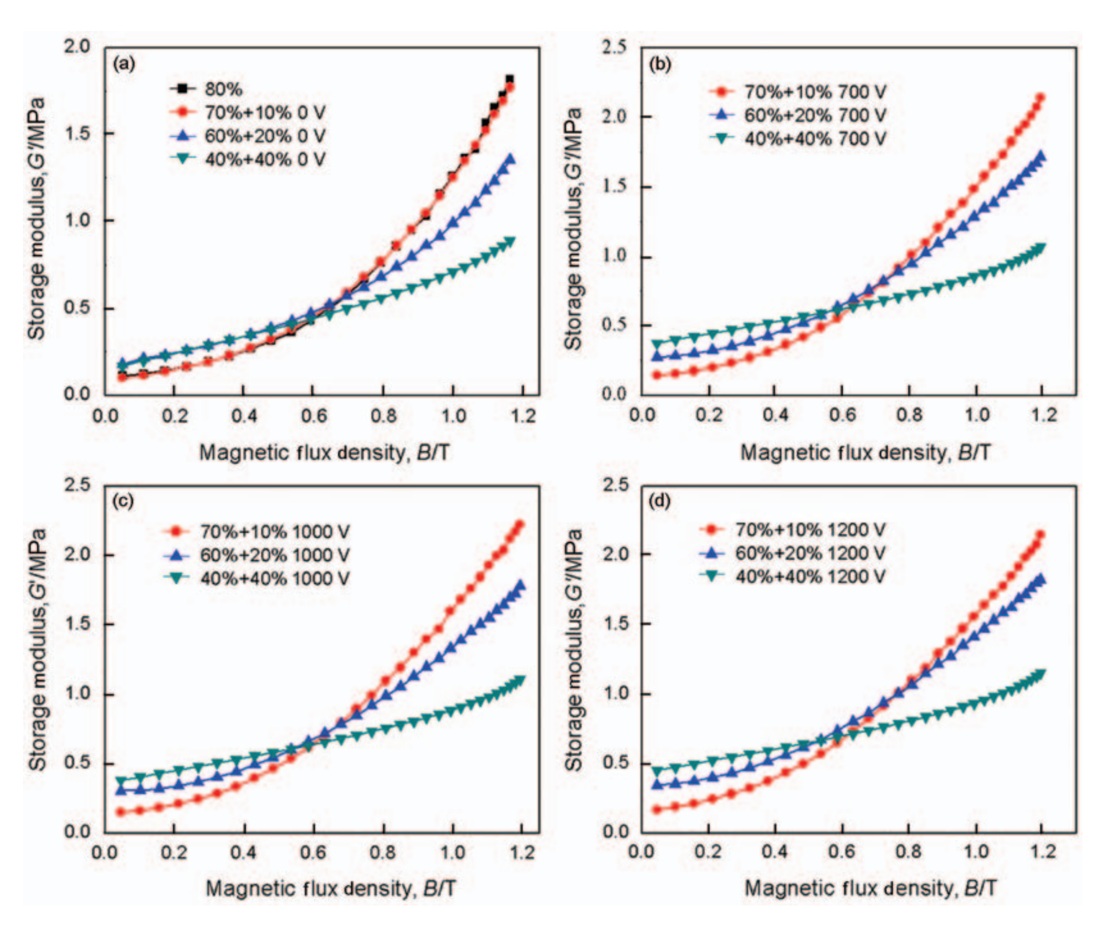


图9 不同配比的混合磁敏弹性体的储能模量与磁场的关系

Fig.9 Magnetic field dependence of storage modulus for Mixed MAE of different proportions

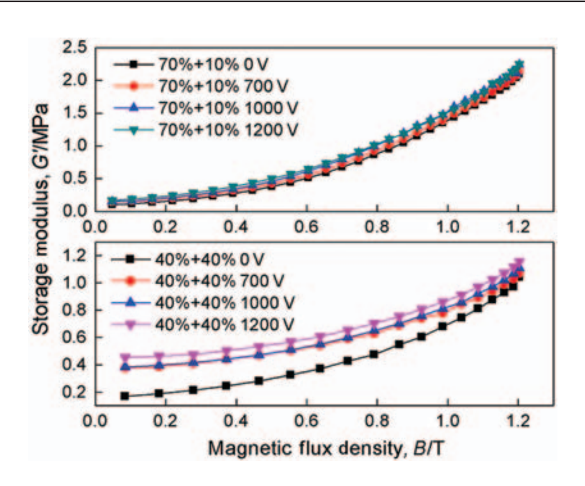


图 10　剩磁对70%+10%、40%+40%混合磁敏弹性体的储能模量与磁场关系的影响

Fig.10 Influence of remanence on magnetic field dependence of storage modulus for 70% + 10%, 40% + 40% mixed MAEs

时, 剩磁越大, 相同外加磁场下弹性体的剪切模量越大。而钕铁硼颗粒质量分数越大, 不同剩磁引起的磁敏弹性体的剪切模量的差异越大, 弹性体的力学性能对剩磁越敏感。对于70%+10%、60%+20%的样品, 不同的剩磁使得磁场扫描曲线在未充磁样品的基础上附加不同的初始模量, 磁致模量变化不大, 充磁的钕铁硼颗粒起到补强剂的作用。但当羰基铁粉与钕铁硼粉配比为1∶1时, 由于硬磁颗粒质量分数较大, 充磁后“内置磁场”作用范围增大, 大多数羰基铁粉包覆在硬磁颗粒周围并被磁化, 较小的充磁电压已大幅提高样品的初始模量, 当测试磁场增大时, 根据软磁材料的磁学特性可知, 羰基铁颗粒的磁化系数先增加后减小, 颗粒间作用力的变化率也表现出了同样的趋势, 因此在磁场增大到一定程度后, 剩磁越大的样品的储能模量的变化率越小, 当测试磁场为1.2T时, 储能模量已相差不大, 导致充磁样品的磁致模量和磁流变效应减小。因此在软磁弹性体内适当添加硬磁颗粒, 增大充磁可起到补强效果。

5 结　论

1. 各向异性纯硬磁弹性体的剪切储能模量要高于各向同性纯硬磁弹性体。各向同性硬磁弹性体的剪切储能模量具有磁场方向的依赖性, 剪切储能模量的最小值并不在零场, 在外磁场方向与弹性体剩磁方向相反时, 弹性体在低磁场下表现出负磁流变效应, 超过某一临界磁场后, 剪切模量随着磁场的增大而增大。

2. 相同配比的混合磁敏弹性体的剪切储能模量随着剩磁的增大而增大。硬磁颗粒质量分数越大, 剪切储能模量越大, 受磁场的影响越敏感。

3. 适当增加硬磁质量分数, 增大充磁电压有助于提高混合磁敏弹性体剪切模量的同时保证磁致模量, 过量的硬磁颗粒会导致零场模量过大使磁致模量及磁流变效应大幅下降。

参 考 文 献

1 G. Filipcsei, I. Csetneki, A. Szilagyi and M. Zrinyi, Magnetic field-responsive smart polymer composites, Adv. Polym. Sci., **206**, 137 (2007)

2 P. Saxena, M. Hossain, P. Steinmann, Nonlinear magneto-viscoelasticity of transversally isotropic magneto-active polymers, Proc. R. Soc., **470**, 20140082(2014)

3 A. V. Chertovich, G. V. Stepanov, E. Y. Kramarenko and A. R. Khokhlov, New composite elastomers with giant magnetic response, Macromol. Mater. Eng., **295**, 336(2010)

4 A. Stoll, M. Mayer, G. J. Monkman and M. Shamonin, Evaluation of highly compliant magneto-active elastomers with colossal magnetorheological response, J. Appl. Polym. Sci., **131**, 39793(2014)

5 J. T. Zhu, Z. D. Xu and Y. Q. Guo, Magnetoviscoelasticity parametric model of an MR elastomer vibration mitigation device, Smart Mater. Struct., **21**(7), 075034(2012)

6 LIAO Guojiang, Mechanical Property of Magnetorheological Elastomer and its Application in Vibration Control, PhD thesis (Anhui, University of Science and Technology of China, 2014))
(廖国江, 磁流变弹性体的力学性能及其在振动控制中的应用, 博士学位论文(安徽, 中国科技大学, 2014))

7 G. J. Liao, X. L. Gong, S. H. Xuan, C. J. Kang and L. H. Zong, Development of a real-time tunable stiffness and damping vibration isolator based on magnetorheological elastomer, Intell. Mater. Syst. Struct., **23**, 25(2011)

8 E. Galipeau, P. P. Castaneda, The effect of particle shape and distribution on the macroscopic behavior of magnetoelastic composites, Int. J. Solids Struct., **49**, 1(2012)

9 P. Andriushchenko, K. Nefedev, and G. Stepanov, Calculations of magnetoactive elastomer reactions in a uniform external magnetic fi eld, Eur. Phys. J. B, **87**, 11(2014)

10 G. Stepanov, D. Borin, S. Odenbach, Magnetorheological effect of magneto-active elastomers containing large particles, J. Phys. Conf. Ser., **149**(1), 012098(2009)

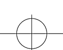
11 P. Zajac, J. Kaleta, D. Lewandowski and A. Gasperowicz, Isotropic magnetorheological elastomers with thermoplastic matrices: structure, damping properties and testing, Smart Mater. Struct., **19**, 045014(2010)

12 O. V. Stolbov, Y. L. Raikher, G. V. Stepanov, A. V. Chertovich, E. Y. Kramarenko and A. R. Khokhlov, Low-frequency rheology of magnetically controlled elastomers with isotropic structure, Polym. Sci. Ser. A, **52**, 1344(2010)

13 I. Bica, Magnetorheological elastomer-based quadrupolar element of electric circuits, Mater. Sci. Eng. B, **166**, 94(2010)

14 A. S. Semisalova, N. S. Perov, G. V. Stepanov, E. Y. Kramarenko and A. R. Khokhlov, Strong magneto dielectric effect in magnetorheological elastomers, Soft Matter, **9**, 11318(2013)

15 G. V. Stepanov, A. V. Chertovich , E. Y. Kramarenko, Magnetorheological and deformation properties of magnetically controlled elas-



tomers with hard magnetic filler, J. Magn. Magn. Mater., **324**, 3448 (2012)

16 G. V. Stepanov, D. Y. Borinb, E. Y. Kramarenko, V. V. Bogdanov, D. A. Semerenko and P. A. Storozhenko, Magnetoactive elastomer based on magnetically hard filler: synthesis and study of viscoelastic and damping properties, Polym. Sci. Ser. A, **56**(5), 603(2014)

17 E. Y. Kramarenko, A. V. Chertovich, G. V. Stepanov, A. S. Semisalova, L. A. Makarova, N. S. Perov and A. R. Khokhlov, Magnetic and viscoelastic response of elastomers with hard magnetic filler, Smart Mater. Struct., **24**, 035002(2015)

18 G. V. Stepanov, D. Y. Borin, Y. L. Raikher, P. V. Melenev and N. S. Perov, Motion of ferroparticles inside the polymeric matrix in magnetoactive elastomers, J. Phys.: Condens. Matter., **20**, 204121(2008)

19 D. Y. Borin, G. V. Stepanov and S. Odenbach, Tuning the tensile modulus of magneto-rheological elastomers with magnetically hard powder, J. Phys. Conf. Ser., **412**, 012040(2013)